

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ СТРУКТУР $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$, ОБЛУЧЕННЫХ ЭЛЕКТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 3.5 МэВ

Н.А. Поклонский¹⁾, Н.И. Горбачук¹⁾, С.В. Шпаковский²⁾, П.С. Бритько¹⁾,
Д.А. Неверовский¹⁾, С.Б. Ластовский³⁾, А. Wiecek⁴⁾

¹⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости 4, Минск, 220030, Беларусь

²⁾ ОАО «ИНТЕГРАЛ», ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Беларусь

³⁾ ГНПО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,
ул. П. Бровки 17, Минск, 220072, Беларусь

⁴⁾ Ruhr-Universitaet Bochum, Universitaetsstrasse 150, Bochum, D-44780, Germany

Исследовались структуры $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$, облученные электронами с энергией 3.5 МэВ. Флюенс облучения варьировался от 10^{13} до $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Показано, что облучение структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ электронами приводит к трансформации вида зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ от постоянного напряжения смещения U . В интервале U , соответствующему режимам обеднения и слабой инверсии, облучение структур электронами флюенсами $10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ вызывает увеличение $\text{tg} \delta$ более чем на порядок, из-за потерь на перезарядку поверхностных состояний. Для структур, облученных электронами флюенсами $\approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, характерно увеличение $\text{tg} \delta$ во всем исследованном диапазоне U (от -40 до $+40 \text{ В}$), что связано с возрастанием токов сквозной проводимости через диэлектрик.

Введение

Важным фактором, способствующим повышению эффективности производства интегральных микросхем и дискретных МДП-приборов, является контроль состояния границы раздела диэлектрик/полупроводник [1]. Мониторинг результатов технологических процессов в совокупности с межоперационным контролем тестовых МДП-структур позволяет увеличить выход годных кристаллов. Традиционно для исследования границ раздела диэлектрик/полупроводник используются методы емкостной спектроскопии [2, 3]. Наличие ловушек носителей заряда на границе раздела, с одной стороны, приводит к дополнительной зависимости емкости и от частоты переменного тока, и от напряжения смещения, что затрудняет анализ вольт-фарадных характеристик, зарегистрированных при фиксированной частоте [2–4]. С другой стороны, это же определяет потенциальную перспективность использования методов импедансной спектроскопии [5]. Выполнение измерений в широком интервале частот позволяет существенно дополнить информацию, полученную из традиционного анализа вольт-фарадных характеристик.

Цель работы — исследовать влияние вводимых облучением электронами дефектов на вольт-фарадные характеристики и частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь структур $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$.

Методика эксперимента

Структуры $\text{Al}/\text{SiO}_2/n\text{-Si}$ изготавливались на пластинах (100) монокристаллического кремния n -типа проводимости с удельным сопротивлением $4.5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (КЭФ-4.5), выращенных методом Чохральского. Толщина пластин — 380 мкм. Слой диоксида кремния формировался термическим окислением при температуре 950°C в течение 225 минут. Толщина слоя SiO_2 составляла 420 нм. На планарной стороне пластины поверх слоя диоксида кремния термическим напылением наносился алюминий. Толщина слоя алюминия — 0,7 мкм. Площадь алюминиевой металлизации на диоксиде кремния — $1,85 \times 1,85 \text{ мм}^2$. Для создания

омического контакта к непланарной стороне кремниевой пластины при температуре 1000°C проводилась диффузия фосфора из газовой фазы PCl_3 в течение 6 мин. Удельное поверхностное сопротивление после диффузии фосфора составляло $4.55 \text{ Ом}/\square$. Контакты к непланарной стороне формировались напылением Al с последующим вжиганием при температуре 400°C в атмосфере азота. Толщина слоя алюминия на омическом контакте к непланарной стороне — 0,7 мкм. Пластины механическим скрайбированием разделялись на кристаллы площадью $2.5 \times 2.5 \text{ мм}^2$.

При комнатной температуре структуры облучались электронами с энергией 3.5 МэВ на ускорителе Научно-практического центра НАН Беларуси по материаловедению.

Измерения действительной и мнимой части импеданса $Z = Z' + iZ''$ выполнялись в диапазоне частот от 20 Гц до 2 МГц на измерителе LCR E4980A. Амплитуда синусоидального измерительного сигнала составляла 40 мВ. Постоянное напряжение смещения U изменялось в пределах от -40 до 40 В. Все измерения выполнялись в темноте при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зарегистрированные при частоте переменного тока $f = 1 \text{ МГц}$ вольт-фарадные характеристики исходных структур и структур, облученных электронами с энергией 3.5 МэВ. Отметим, что помимо сдвига напряжения плоских зон, для облученных структур наблюдается существенное изменение вида вольт-фарадных характеристик. Например, по сравнению с исходными, рост емкости C облученных структур происходит в существенно более широком интервале U . Согласно [2, 3] это связано с влиянием заряда, локализованного на поверхностных состояниях. Характерной особенностью вольт-фарадных характеристик облученных структур является меньшие значения емкости в режиме сильной инверсии. Для облученных структур данный режим наблюдается при напряжениях смещения -20 В и менее, для исходных — при

$U < -8$ В. Снижение емкости в режиме сильной инверсии связано с компенсацией кремния радиационными дефектами, что приводит к большей толщине слоя области пространственного заряда в кремнии [3].

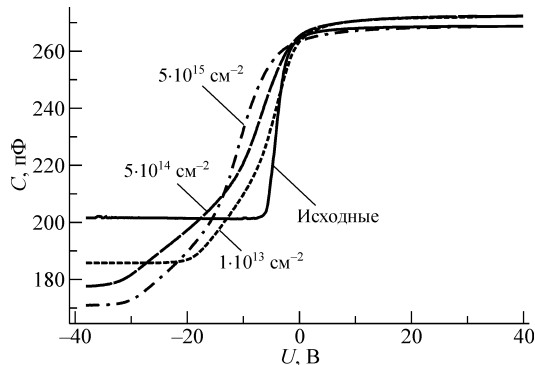


Рис. 1. Вольт-фарадные характеристики структур $\text{Al/SiO}_2/\text{n-Si}$, зарегистрированные при частоте переменного тока 1 МГц. Флюенсы облучения электронами с энергией 3.5 МэВ указаны на рисунке.

На рис. 2 показаны зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ исходных и облученных структур от напряжения смещения U . Зависимости $\text{tg } \delta(U)$ для исходной структуры имеют максимум при напряжении $U \approx -4$ В. Рост флюенса облучения приводит к значительному (более порядка) увеличению потерь в интервале напряжений от -20 до 0 В и сдвигу максимума на зависимости $\text{tg } \delta(U)$ в направлении отрицательных значений U . Для структур, облученных электронами флюенсами $\approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, характерно увеличение $\text{tg } \delta$ во всем исследованном диапазоне U (от -40 до $+40$ В).

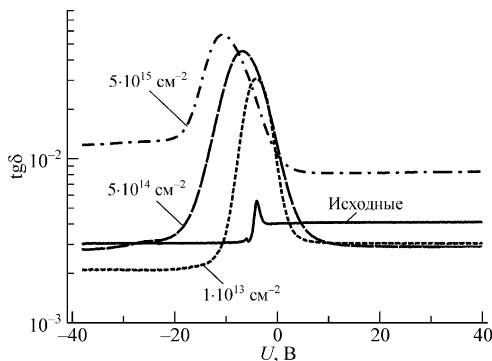


Рис. 2. Зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ от напряжения обратного смещения U . Флюенсы облучения электронами с энергией 3.5 МэВ указаны на рисунке. Измерения выполнены при частоте переменного тока 1 МГц.

Возможными являются несколько причин увеличения $\text{tg } \delta$ по мере роста флюенса облучения электронами: рост токов сквозной проводимости, происходящий за счет накопления радиационных дефектов в окисле [2, 3]; увеличение потерь на перезарядку радиационных дефектов в области пространственного заряда кремния [6] за счет роста их концентрации; и увеличение потерь на перезарядку поверхностных состояний [2, 3].

Первая из указанных причин должна приводить к увеличению $\text{tg } \delta$ практически при любых

напряжениях смещения и, как следует из данных, представленных на рис. 2, существенный вклад она вносит при флюенсах облучения $\approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При меньших флюенсах облучения наиболее вероятным является рост $\text{tg } \delta$ за счет увеличения потерь, связанных с перезарядкой поверхностных состояний. Известно [3], что вероятность захвата носителей заряда поверхностными состояниями существенно зависит от величины (и знака) поверхностного потенциала. В таком случае максимум $\text{tg } \delta$ должен наблюдаться при напряжениях, соответствующих режимам обеднения структур, что и видно на рис. 2. Кроме этого, согласно [2–4], перезарядка центров с глубокими уровнями, к которым относятся и поверхностные состояния должна сопровождаться дисперсией емкости.

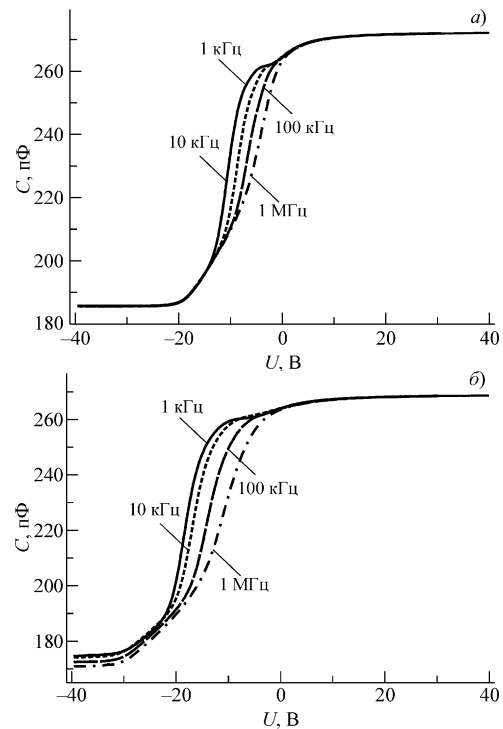


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики структур $\text{Al/SiO}_2/\text{n-Si}$, облученных электронами с энергией 3.5 МэВ флюенсом 10^{13} см^{-2} (а) и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б). Значения частот переменного тока, при которых выполнялась регистрация вольт-фарадных характеристик указаны на рисунке.

На рис. 3. представлены вольт-фарадные характеристики структур $\text{Al/SiO}_2/\text{n-Si}$, облученных электронами с энергией 3.5 МэВ флюенсом 10^{13} см^{-2} (а) и $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ (б). Видно, что для структур, облученных электронами как минимальным, так и максимальным (из используемых в данной работе) флюенсами, наиболее значительная дисперсия емкости наблюдается в интервале напряжений от -20 до 0 В, что согласуется с высказанным ранее предположением об определяющем влиянии потерь, связанных с перезарядкой поверхностных состояний. Для структур, облученных электронами флюенсом $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, при напряжениях смещения $U < -30$ В также наблюдается дисперсия емкости. Она связана с перезарядкой радиационных дефектов, локализованных в области пространственного заряда кремния [6].

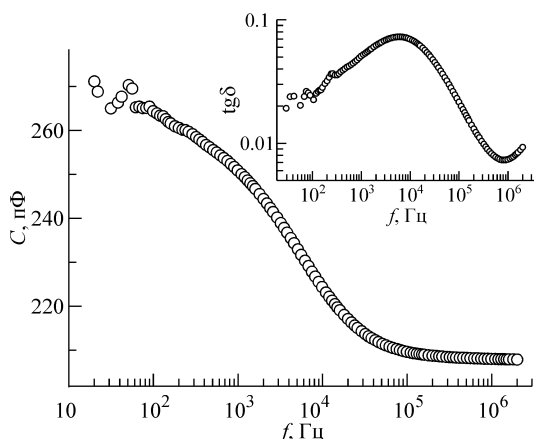


Рис. 4. Зависимость емкости C от частоты переменного тока f для диодов, облученных электронами с энергией 3 МэВ флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. На вставке — зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ от частоты f переменного тока. Зависимости получены при напряжении смещения $U = -14 \text{ В}$.

На рис. 4 показана зависимость емкости C от частоты переменного тока f для диодов, облученных электронами с энергией 3.5 МэВ флюенсом $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Представленные данные подтверждают результаты, приведенные на рис. 3. Видно, что при низких частотах, когда в суммарный заряд вносят свой вклад поверхностные состояния емкость структуры больше. По мере увеличения частоты, перезарядка поверхностных состояний не успевает «отслеживать» изменения электрического потенциала и соответственно емкость снижается [3]. На вставке рис. 4 показана зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ от частоты f переменного тока. Видно, что максимум зависимости $\text{tg} \delta(f)$ наблюдается при частотах, соответствующих дисперсии электрической емкости.

Закключение

Показано, что для структур $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$, облученных электронами с энергией 3.5 МэВ флюенсами 10^{13} – $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, характерна существенная дисперсия емкости при напряжениях постоянного

смещения U , соответствующих режимам обеднения и слабой инверсии. Дисперсия электрической емкости связана с перезарядкой поверхностных состояний и сопровождается появлением максимума на зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ от частоты f переменного тока.

Установлено, что облучение структур $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$ электронами приводит к трансформации вида зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg} \delta$ от постоянного напряжения смещения U . В интервале U , соответствующему режимам обеднения и слабой инверсии, облучение структур электронами флюенсами 10^{13} – $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ вызывает увеличение $\text{tg} \delta$ более чем на порядок, из-за потерь на перезарядку поверхностных состояний. Для структур, облученных электронами флюенсами $\approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, характерно увеличение $\text{tg} \delta$ во всем исследованном диапазоне U (от -40 до $+40 \text{ В}$), что связано с возрастанием токов сквозной проводимости через диэлектрик.

Работа выполнена при поддержке ГПНИ «Электроника и фотоника» (задание 1.1.12).

Список литературы

1. *3u* С.Технология СБИС. М.: Мир, 1986. Ч1. 406 с.
2. Nicolian E.H., Goetzberger A. // The Bell System Technical Journal. 1967. V. XLVI. № 6. P. 1055–1133.
3. Sze S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology, 2nd ed., New York: Wiley. 2001. 574 p.
4. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир. 1977. 562 с.
5. Impedance spectroscopy: Theory experiment and applications / Ed. by E. Barsoukov, J.R. Macdonald. N.Y.: Wiley. 2005. 595 p.
6. Поклонский Н.А., Горбачук Н.И., Шпаковский С.В., Ластовский С.Б., Wieck A. // ФТП. 2010. Т. 44, № 3. С. 397.

DIELECTRIC LOSSES OF $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$ STRUCTURES IRRADIATED WITH 3.5 MeV-ELECTRONS

N.A. Poklonski¹⁾, N.I. Gorbachuk¹⁾, S.V. Shpakovski²⁾, P.S. Britko¹⁾,
D.A. Neverovskii¹⁾, S.B. Lastovskii³⁾, A. Wieck⁴⁾

¹⁾ Belarusian State University, pr. Nezavisimosti 4, Minsk, BY-220030, Belarus,
phone: 209-51-10, e-mail: gorbachuk@bsu.by

²⁾ JSC "INTEGRAL", ul. Kazintsa 121A, Minsk, BY-220108, Belarus

³⁾ SSPA "Scientific and Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus",
ul. P. Brovki 19, BY-220072, Minsk, Belarus

⁴⁾ Ruhr-Universitaet Bochum, Universitaetsstrasse 150, D-44780, Bochum, Germany

$\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$ structures irradiated with 3.5 MeV-electrons are studied. Irradiation fluence was varied in the range from 10^{13} to $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. It is shown that the irradiation of the $\text{Al/SiO}_2/n\text{-Si}$ structures with electrons leads to the transformation of the behavior of dependences of the loss tangent $\text{tan} \delta$ on the bias voltage U . In the range of U , which corresponds to the depletion regime and weak inversion, the irradiation of the structures with electrons with fluences of 10^{13} – $5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ causes increase in $\text{tan} \delta$ more than an order of magnitude due to the losses caused by the recharging of surface states. For the structures irradiated with electrons with fluences $\approx 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, it is characteristic the increase in $\text{tan} \delta$ in the whole range of examined U (from -40 to $+40 \text{ В}$) due to the increase in the currents that pass through dielectric.